

Dr. RODOLFO MANNHEIM C.



Aleaciones con memoria

INTRODUCCION

En los últimos quince años se han hecho conocidas, aleaciones que después de una deformación plástica a baja temperatura, vuelven a su forma original cuando son calentadas sobre una temperatura crítica. Por medio de trabajos de investigación posteriores, fueron descubiertos otros procesos en los cuales, después de una primera deformación aparece un cambio reversible en la forma, debido a un calentamiento y posterior enfriamiento. Estas propiedades son denominadas "efecto de memoria en una dirección o bien en dos direcciones" y son ilustradas en la fig. 1. Los pasos de "deformación" y "regreso a la forma por calentamiento" pueden ser repetidos a voluntad para el efecto de memoria en una dirección.

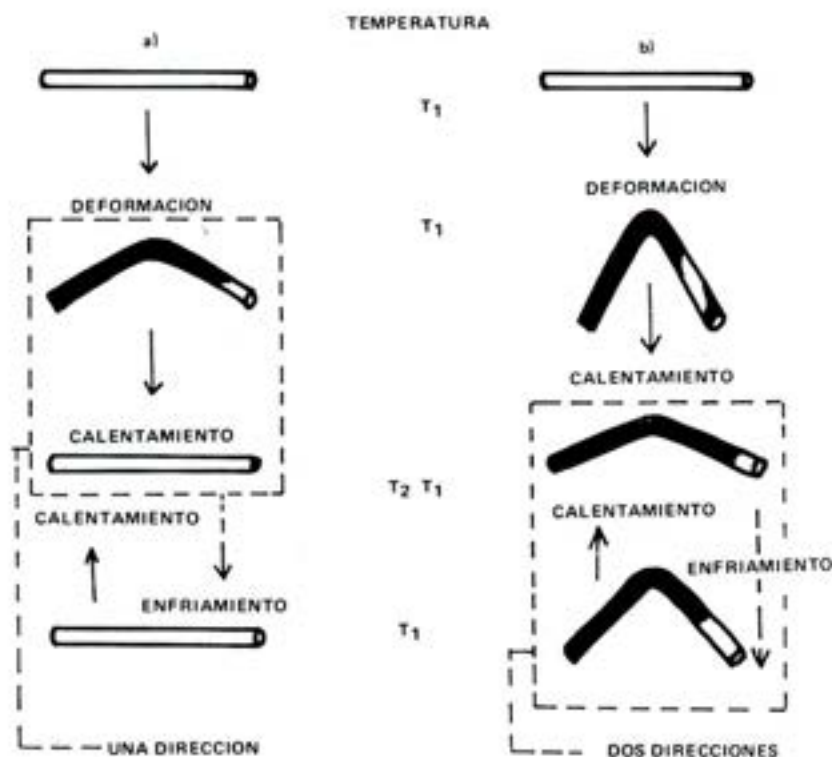
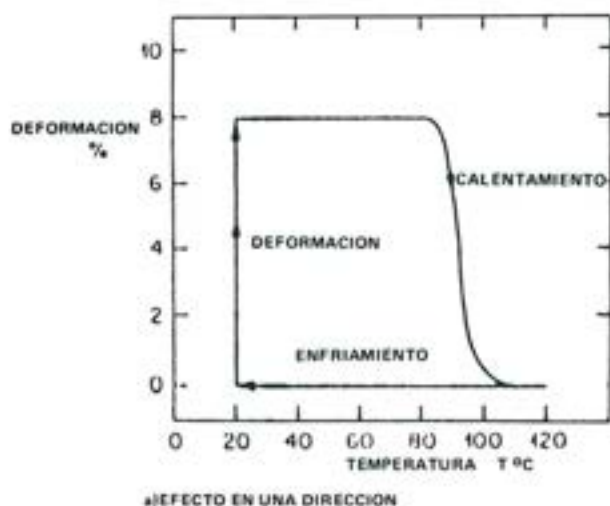


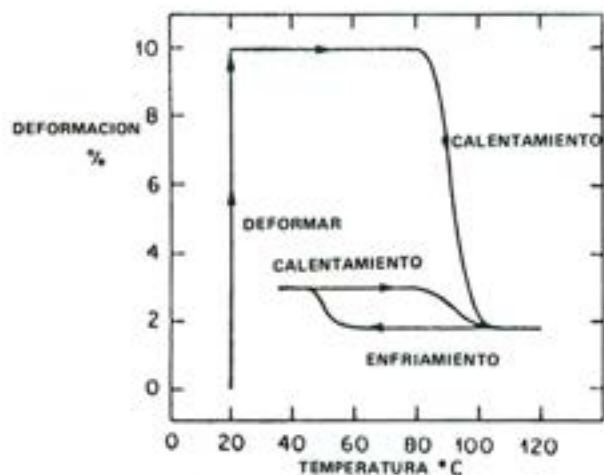
Figura 1: Principio del efecto de memoria en la forma a) El efecto en una dirección se desarrolla bajo un valor crítico de deformación que debe ser sobrepasado, de manera que la contracción no sea totalmente regresiva al calentar.

Otra representación del efecto de memoria se observa en la fig. 2. Dependiendo de la aleación, para el "efecto de memoria en una dirección" se logran de-

formaciones de hasta un 8% al calentar en un intervalo de temperatura entre 30°C y 100°C, mientras que para el "efecto de memoria en dos direcciones" se



a) EFECTO EN UNA DIRECCIÓN



b) EFECTO EN DOS DIRECCIONES

Figura 2: Deformación como función de la temperatura. a) Efecto en una dirección; b) En dos direcciones.

debe alcanzar una deformación crítica de 10%. En comparación con un bimetálico, se podría, según lo anterior, lograr un gran cambio de forma para un pequeño intervalo de temperatura. El cambio de forma al calentar se lleva a cabo, en una aleación con memoria Ni Ti, con un esfuerzo de 700 Nmm^{-2} . El comienzo de la transformación al calentar puede fluctuar, dependiendo de la aleación y composición, entre -180°C y $+150^\circ\text{C}$.

EFFECTO DEL MECANISMO

Transformación de la fase martensita.

Debido a que no todos los metales muestran un efecto de memoria, nos referiremos ahora a las propiedades que se requieren del material para alcanzar tal efecto. La exigencia fundamental es que la aleación deberá acusar una transformación martensítica.

La transformación martensítica se basa en un proceso de cizalle y toma lugar al disminuir la tempera-

tura. La relación entre la fase de alta temperatura, la que normalmente se le denomina austenita y la martensita se muestra esquemáticamente en la fig. 3. Al enfriar la red de la austenita se deforma por cizalle, en donde los átomos se mueven cooperativamente y por ello se origina la estructura de la nueva fase. Una consecuencia del movimiento cooperativo es que el sector del cristal que migra cambia su forma exterior. En el caso que un bloque, en el interior de un cristal, fuese cizallado homogéneamente al producirse el cambio de la estructura del cristal, aparecerán grandes cambios de forma y con ello también tensiones. No obstante para bajar la energía elástica a un mínimo se requiere que ocurra un segundo cizalle, por el cual la estructura cristalina permanece invariable y el cambio de forma será pequeño. Los dos cizalles posibles se

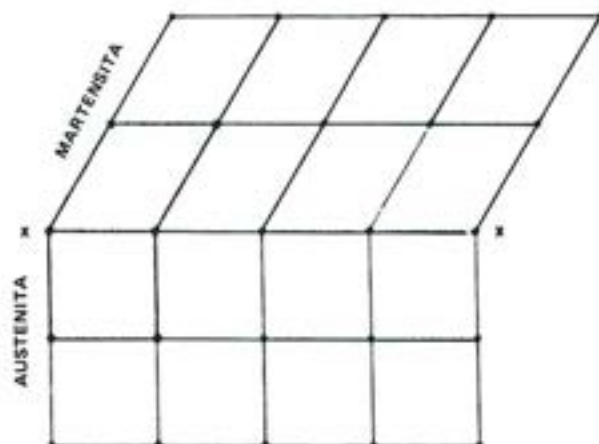


Figura 3: La relación entre la estructura de la fase austenita y martensita. Por medio de un cizalle paralelo a XX se producirá martensita.

observan en la fig. 4. En todo caso habrá siempre una pequeña diferencia de volumen entre las fases, y también en realidad, la transformación no es un proceso de cizallamiento puro, sino que una parte de los átomos tienen movimientos que no son paralelos a la dirección del cizalle. Se origina por ello una diferencia de volumen transversal a la superficie interfacial.

Al analizar la energía libre como función de la temperatura, fig. 5, observamos que a altas temperaturas la austenita posee la energía libre más baja y a bajas temperaturas la tendrá la martensita. A una temperatura T_b las dos fases tendrán la misma energía libre, es decir, que una unidad de volumen de martensita estará en equilibrio termodinámico con una unidad de volumen de austenita. Cuando nosotros, al enfriar deseamos generar martensita en la austenita, debemos enfriar bajo T_b , debido a que la diferencia de volumen debe proveernos la energía elástica, o dicho de otra manera, hay una energía de nucleación.

En la fig. 6 se observa la unidad en volumen de martensita como función de la temperatura. Podemos

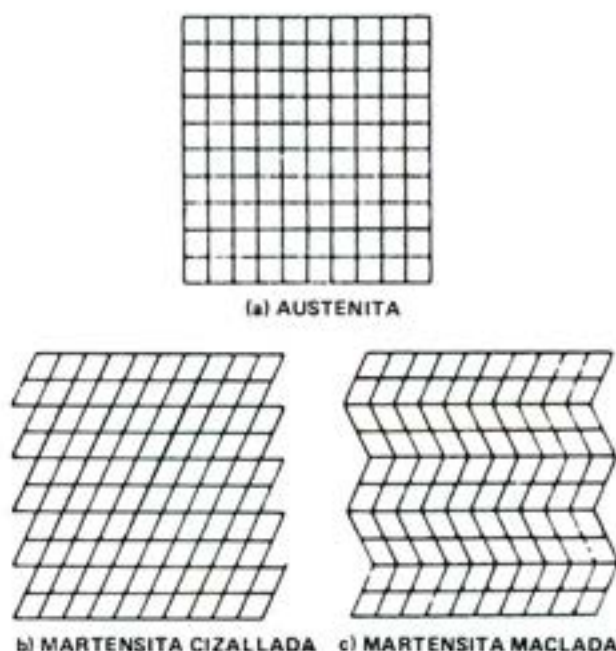


Figura 4: Los dos cizalles posibles con lo cual permanece inalterada la estructura de la martensita y el cambio de forma será pequeño.

ver que la austenita debe ser enfriada bajo T_0 antes de que se hayan formado núcleos de martensita. La martensita se producirá recién a una temperatura M_s y a M_f habrá finalizado la transformación, es decir, no habrá austenita remanente.

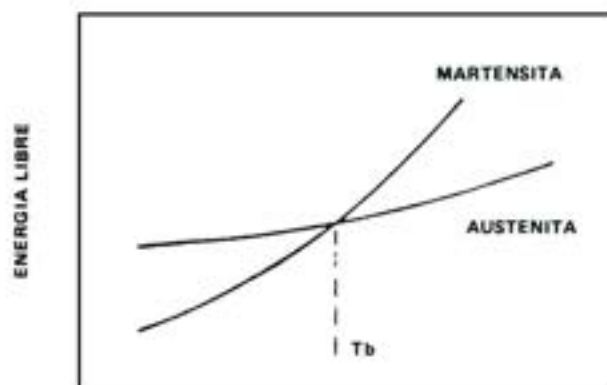


Figura 5: La energía libre en función de la temperatura para las dos fases (esquemático).

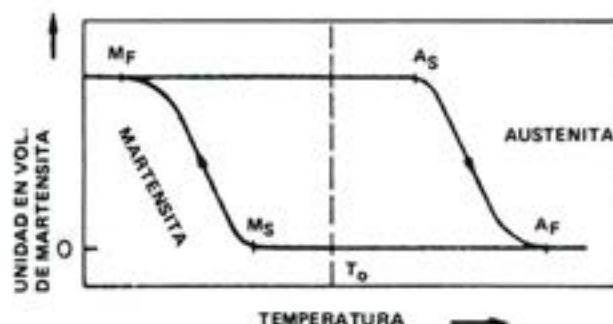


Figura 6. Unidad de volumen de martensita en función de la temperatura. Se produce un ciclo de histéresis.

Esta descripción es válida para todas las transformaciones martensíticas independientes de la aparición de un efecto de memoria. Para temperaturas ligeramente superiores a M_s , la tensión aportada puede contribuir a proveer la energía de nucleación para la martensita. Según eso, se puede, en un rango de temperatura sobre M_s , producirse martensita inducida por tensión, mientras que en ausencia de una tensión no se puede llegar a la formación de martensita.

Para aleaciones con memoria las restricciones cristalográficas constituyen el número de grados de libertad disponibles, de tal manera que al calentar la martensita sólo se podrá producir la orientación original de la austenita. En una martensita inducida por esfuerzo, se puede recuperar el cambio de forma producido por deformación, al calentar el material. El efecto de memoria se basa en la obtención de una nueva fase (martensita) por deformación y por la involución de la fase original por calentamiento (ver fig. 7).

Pero cuando la aleación está recién enfriada bajo M_f , se forman numerosas orientaciones de martensita, de manera que los cambios de forma son, en lo posible, pequeños. Debido a una deformación se favorecerá una orientación en la martensita y por medio de distintos mecanismos, entre otros un proceso de cizalle-maclado, toma lugar una reorientación, después de la cual sólo permanecen las orientaciones preferenciales. Al calentar, toma lugar al mismo tiempo, una transformación restauradora y un cambio de forma hasta que el cristal retorne a la orientación y forma original de la austenita (fig. 8).

Resumiendo: las principales exigencias para producir el efecto de memoria son:

a) El material debe sufrir una transformación martensítica. La diferencia de volumen entre las dos fases debe ser pequeña. Cuando esta diferencia es muy grande como por ejemplo; en aceros, entonces se producirán muchas dislocaciones para que ajuste la diferencia de volumen. Debido al fuerte aumento de la densidad de dislocaciones se compactará la martensita y ya no será posible una reorientación por la tensión aplicada. Para los aceros la transformación martensítica juega un papel primordial en el endurecimiento. En contraposición, la formación de martensita no nos conduce a ningún endurecimiento en las aleaciones con memoria, porque la diferencia de volumen es muy pequeña.

b) La estructura debe ser ordenada. En la transformación reversible de martensita a austenita el número de grados de libertad disponibles dependerá de las restricciones cristalográficas; además, sólo la orientación original de austenita podrá ser obtenida al calentarse. Durante la transformación reversible las direcciones de movimiento de los átomos no deberán ser arbitrarios, de lo contrario se tendrá un reordenamiento de la austenita.

Las exigencias anteriores son cumplidas por numerosas aleaciones, pero sólo aleaciones del tipo NiTi, CuZn y CuAl tienen importancia técnica. Las características de estas aleaciones se aprecian en la tabla 1.

Hasta el momento sólo hemos descrito el efecto en una dirección. Tal como se explicó antes, la deformación aplicada tendrá que ser sobre un valor crítico para que se produzca el efecto de dos direcciones.

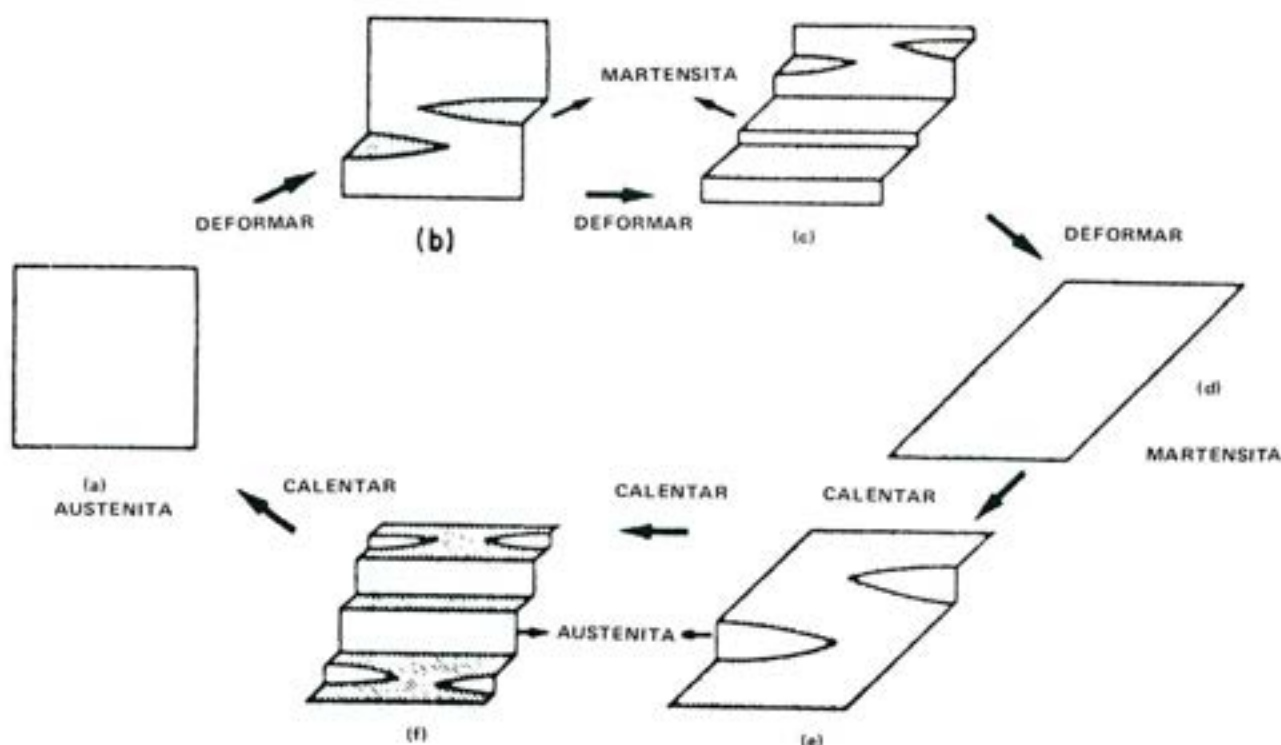


TABLA 1:
Propiedades de las aleaciones con memoria

Propiedades	NiTi	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni
Densidad (g/cm ³)	6,4 - 6,5	7,8 - 8,0	7,1 - 7,2
Conductividad eléctrica (10 ⁶ $\frac{S}{m}$)	1 - 1,5	8 - 13	7 - 9
Resistencia a la tracción (N/mm ²)	800 - 1000	400 - 700	700 - 800
Alargamiento de ruptura (%)	40 - 50	10 - 15	5 - 6
Máx. temperatura A _s (°C)	120	120	170
Máx. efecto en una dirección (%)	8	4	5
Máx. efecto en dos direcciones (%)	5	1	1,2
Sobrecalentamiento hasta (°C)	400	160	300

Figura 7: Representación esquemática de la obtención de martensita por deformación e involución de la fase primitiva (y forma) por calentamiento.

En la fig. 9 se observa la curva esfuerzo-deformación para una aleación NiTi. A bajos esfuerzos se producirá una reorientación de la martensita, luego al aumentar el esfuerzo nuevamente y después del punto A, toma lugar una deformación plástica irreversible. Esta parte de deformación normal no será recuperada con un calentamiento; es decir, prevalece una deformación irreversible. Al enfriar nuevamente se favorece el campo de tensiones propias de las irregularidades de la estructura que producirá una involución en la orientación de la martensita, que a su vez, se debió a las tensiones originales aplicadas; esto producirá que al enfriar tome lugar un pequeño cambio de forma en dirección de la deformación original. En sucesivos ciclos térmicos se producirá un pequeño efecto en dos direcciones. Este efecto está esquematizado en la fig. 10.

COMPARACION CON UN BIMETAL

Un bimetal es un elemento que entrega una determinada fuerza en función de la temperatura, lo cual lo hará remplazable por una aleación con memoria.

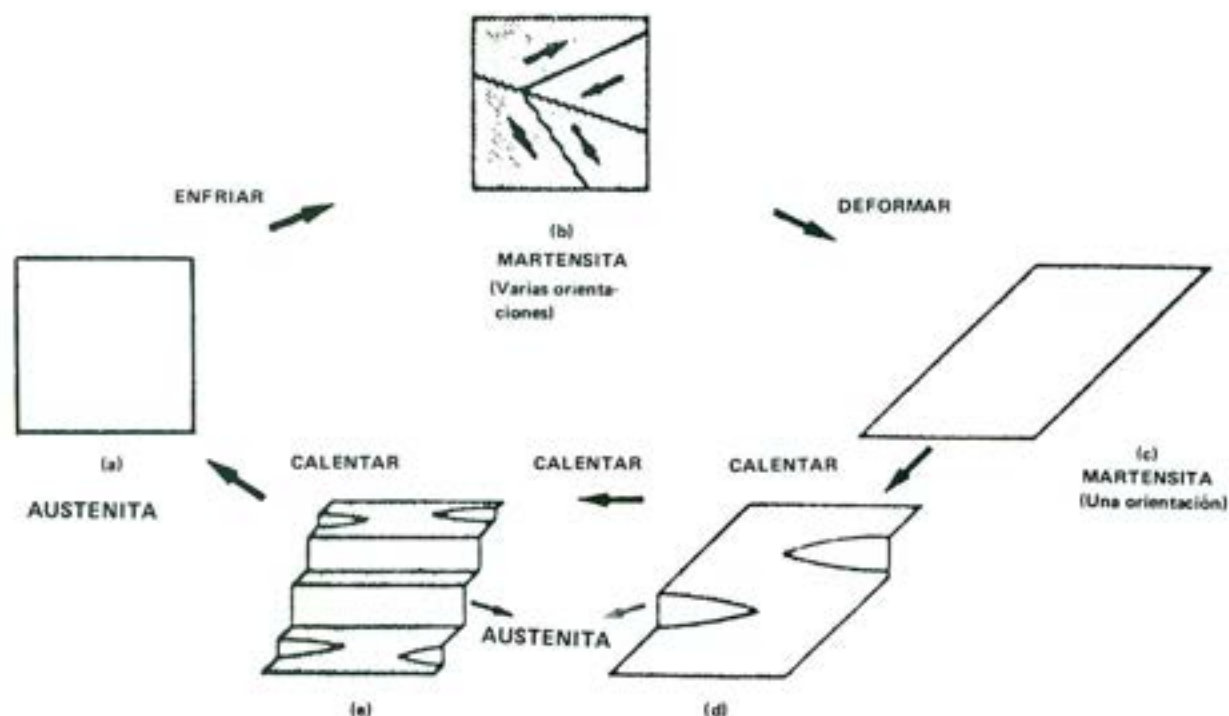


Figura 8: Representación esquemática de la reorientación de martensita por medio de una deformación e involución de la fase primitiva (y forma) por calentamiento.

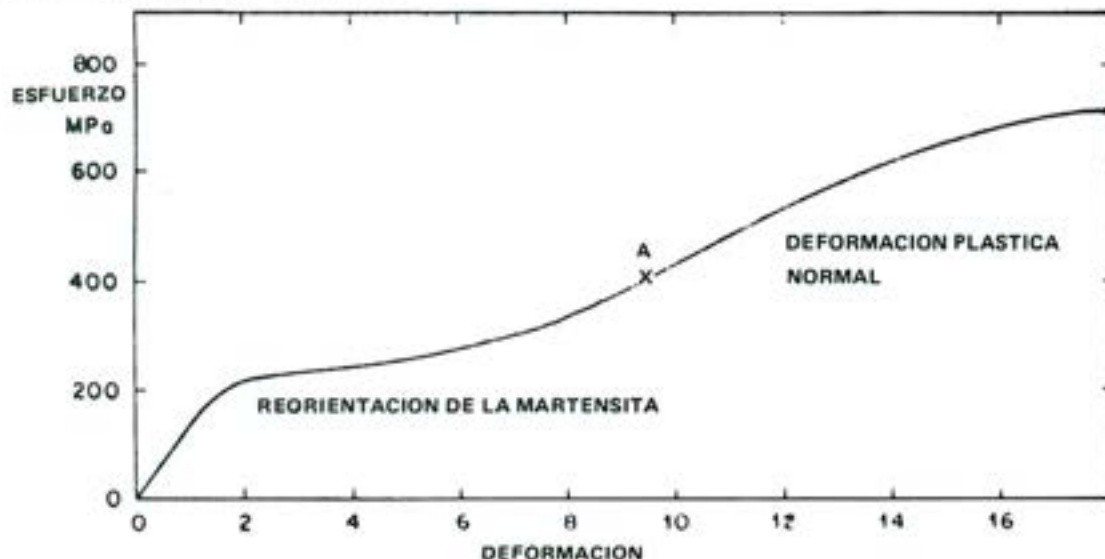


Figura 9: Curva esfuerzo deformación para una aleación NiTi con $M_s=70^{\circ}\text{C}$, a temperatura ambiente.

Existen, en todo caso, diferencias importantes entre ellos:

1. Las aleaciones con memoria proporcionan más trabajo por unidad de volumen (hasta un factor 100 o un factor 500 según el uso), lo que significa que puede utilizarse una menor masa que proporcionará el mismo trabajo que un bimetálico.

2. Distintos tipos de movimientos pueden ser utilizados con las aleaciones con memoria (a diferencia de sólo flexión en los bimetálicos) ya que dichas aleaciones pueden manufacturarse de distintas formas.

3. El trabajo en una aleación con memoria es realizado en un pequeño intervalo de temperatura, mientras que un bimetálico el trabajo es proporcional a

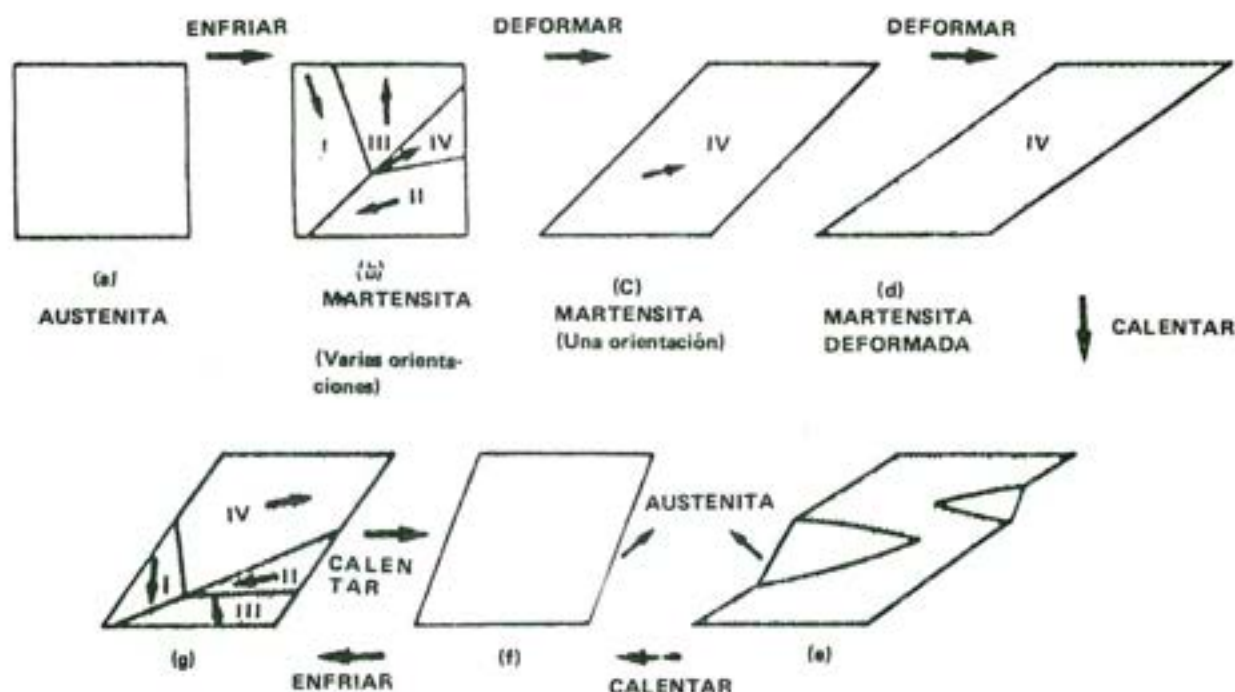


Figura 10: Representación esquemática del efecto en dos direcciones para el caso de una martensita tensionada y reorientada (análogo a la fig. 7, se puede producir el efecto de dos direcciones cuando la martensita se obtiene por deformación). Después de la reorientación (c) se seguirá deformando, y al calentar permanece esta deformación como austenita (comparar a y f). Al enfriar se producirá con una orientación martensítica, la que fue obtenida por una tensión de reorientación y así obtenemos un cambio de forma (comparar b y g).

la diferencia al cuadrado entre la temperatura del bimetálico y la ambiente.

APLICACIONES DE LAS ALEACIONES CON MEMORIA

Las aleaciones con memoria pueden dar origen a productos cuyos usos abarcan gran variedad de mercados. La real potencialidad de estas aleaciones no se conoce, ya que sus usos han empezado a desarrollarse y diversificarse sólo en los últimos años.

Normalmente estas aleaciones con memoria son utilizadas, en forma de resortes. Este se expande al calentarse por sobre la temperatura de transición (la cual es función de la composición de la aleación) y se contrae al enfriarse por debajo de dicha temperatura. También estas aleaciones pueden ser manufacturadas en otras formas; por ej. como simples actuadores lineales, utilizándolas en funciones tales como: dispositivo para abrir y cerrar ventanas de invernaderos, reguladores de ductos de aire, puertas de seguridad contra fuego y muchos otros usos como controladores de temperatura.

La industria automotriz representa un vasto mercado potencial para las aleaciones con memoria, diseñándose, p. ej., un ventilador de automóvil cuya velo-

cidad de rotación es proporcional al enfriamiento demandado, y válvulas de control de combustible en motores diésel, sistemas en los cuales los cambios de temperatura activan los mecanismos gracias al efecto de memoria. Pero, no sólo en dispositivos, válvulas y mecanismos en general puede ser usada esta propiedad, ya que es posible la fabricación de materiales para usos específicos a partir de aleaciones con el efecto de memoria. Una muestra de ello es la utilización de remaches (con memoria en una dirección) que ajustan al ser calentadas sus cabezas, y son especialmente empleables cuando es difícil fijar los remaches convencionales.

Otros usos relevantes se encuentran en todos los tipos de sistema para alerta, control y regulación, los cuales se activan térmicamente. Algunos ejemplos son:

Sensores de temperatura

- Indicador de temperatura en estanques de electrólisis.

En la electrorrefinación de metales, la detección de cortocircuitos es efectuada por un equipo termográfico infrarrojo.

Sin embargo, este medio de detección no es factible en pequeños estanques, así como en celdas de electroobtención, en las que los accidentes térmicos

son muy frecuentes, especialmente en la puesta en marcha de ellas. Un dispositivo dotado del efecto de memoria representa una buena solución.

— Válvulas de seguridad para líneas de gas

Un mecanismo de seguridad activado con un resorte con efecto de memoria en su posición de equilibrio, permitirá flujo constante de gas, pero cualquier variación de temperatura sobre el nivel activa el resorte, expandiéndolo, y produciendo el cierre de la válvula.

APLICACIONES MEDICAS

Las aleaciones con memoria pueden ser convenientemente utilizadas en el campo de la ortopedia, en la fabricación de equipos para ejercicios ki-

nesiterápicos de músculos y articulaciones, los cuales funcionan por conducción alternada de agua caliente y fría.

BIBLIOGRAFIA

1. L. Mc Donald Schetky, "Shape Memory Effect Alloys". Canadian Copper N° 90, p. 22. Fall 82.
2. P. Tautzenberger y D. Stöckel, "Bauteile mit Formgedächtniseffekt". Konstruktion Elemente Methoden, octubre 1983, año 20, p. 69.
3. W. Vermeersch, "Proteus Shape Memory alloy Applications", Copper'83 Royal Lancaster Hotel, London, 1 - 2 Nov. 1983, P. 39.1.
4. K.N. Melton y O. Mercier, "Mechanismus und Anwendungen des Formgedächtniseffektes", Material + Technik, 6 (1978), Nr. 2, p. 59.

BREVISIMO

ALUMNOS DISTINGUIDOS

La Facultad distinguió a Mario García Alvarado, de la carrera de Ingeniería Civil Metalúrgica y a Carlos San Martín Ayala, de la carrera de Ingeniería de Ejecución Mecánica, como los mejores alumnos de la Facultad. Además, el ingeniero García Alvarado recibió un premio especial por su rendimiento académico y cualidades personales, de la Fundación Enrique Froemel.

La entidad antes mencionada también otorgó premios a los estudiantes destacados en cada especialidad en el orden que sigue:

Ingeniería Eléctrica: Esteban Vuchetich de Cheney Chirino.

Ingeniería Industrial: Miguel González Lorenzo.

Ingeniería Mecánica: Eduardo Astorquiza Becker.

Ingeniería Metalúrgica: Luis Manzor Pavez.

Alumnos de la promoción 1985-1986, durante la ceremonia de graduación

Ingeniería de Minas: René Oliva Saldías.

Ingeniería en Obras Civiles: Pedro Bernabé Alday.

Ingeniería Química: Luz Olcese Garcés.

